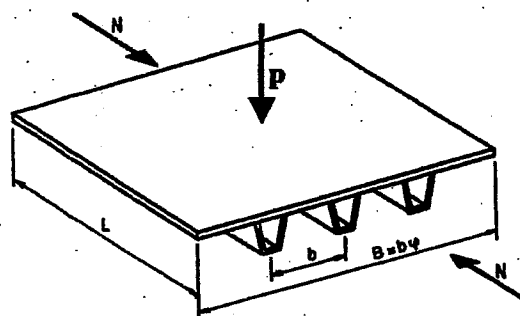


HAJLÍTOTT ÉS NYOMOTT BORDÁZOTT LEMEZEK TERVEZÉSE MINIMÁLIS KÖLTSÉGRE

MINIMUM COST DESIGN OF STIFFENED PLATES LOADED BY UNIAXIAL COMPRESSION AND LATERAL PRESSURE

Virág Zoltán doktorandusz, Jármű Károly egyetemi tanár
Miskolci Egyetem ALT

ABSTRACT. The elastic secondary deflection due to compression and lateral pressure is calculated using the Paik's solution [1] of the differential equation for orthotropic plates. Besides this deflection deformations arise due to lateral pressure and the shrinkage of longitudinal welds. Trapezoidal stiffeners are used to avoid the tripping of open section ribs. The constraint on local buckling of the base plate strips is also included considering the effect of initial imperfections and residual welding stresses with formulae proposed by Mikami and Niwa [2]. The cost function to be minimized includes material and welding costs.



1. ábra Nyomott és hajlított hosszirányban bordázott lemez

1. BEVEZETÉS

A hegesztett bordázott lemezeket széles körben használják különböző terhelésű szerkezeteknél, pl. hajóknál, hidaknál, tartályoknál. Változatos igénybevételeknek vannak kitéve, pl. nyomás, hajlítás, nyírás vagy kombinált terhelés. Sokan végeztek rájuk vizsgálatot [1, 2, 3, 4], de a szerkezetek optimalizálásával csak kevesen foglalkoznak [5, 6, 7]. A cikk célja hosszirányban bordázott lemezek minimális költségre való méretezése Paik [8, 9] és Mikami & Niwa [10] szilárdsági méretezési módszerével. A feszültségi feltételeknél figyelembe vesszük az függőleges terhelésből, nyomófeszültségből és a hosszirányú hegesztés következtében fellépő összehúzódból származó elhajlást. Trapéz bordázatot azért használunk, mert ezzel kiküszöbölhető a nyílt szelvényű bordáknál előforduló kifordulás. A költségfüggvény tartalmazza az anyag és hegesztési költséget is. Ismeretlennek tekintjük az alaplemez vastagságát, a bordák méreteit és számát.

2. A BORDÁZOTT LEMEZ GEOMETRIÁJA

A bordázott lemez az 1. ábrán, a 2. ábrán a keresztmetszet egy része látható trapéz bordázattal. A keresztmetszet geometriai jellemzőit a következőképpen írhatjuk le.

$$A_s = (a_1 + 2a_2)t_s \quad (1)$$

$$I_s = a_1 h_s^3 t_s + \frac{2}{3} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha \quad (2)$$

$a_1 = 90$, $a_2 = 300$ mm, így

$$h_s = (a_2^2 - 105^2)^{1/2}; \sin^2 \alpha = 1 - \left(\frac{105}{a_2}\right)^2 \quad (3)$$

$$y_G = \frac{a_1 t_s (h_s + t_F/2) + 2a_2 t_s (h_s + t_F/2)}{b t_F + A_s} \quad (4)$$

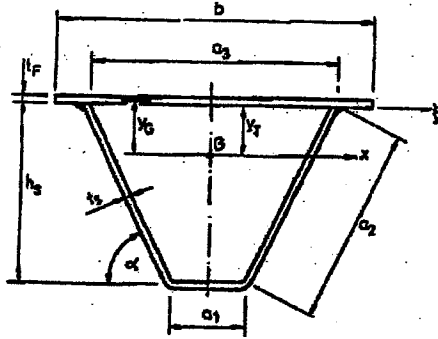
$$I_x = \frac{b t_F^3}{12} + b t_F y_G^2 + a_1 t_s \left(h_s + \frac{t_F}{2} - y_G \right)^2 + \frac{1}{6} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha + 2a_2 t_s \left(\frac{h_s + t_F}{2} - y_G \right)^2 \quad (5)$$

A sarokvarrat nagysága $a_w = 0.5t_s$, de legalább $a_{wmin} = 4$ mm.

A trapézborða helyi horpadása meghatározható

$$a_2/t_s \leq 38\varepsilon; \quad \varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (6)$$

ahol f_y a folyási határ.



2. ábra Trapéz borda méretezése

3. NYOMÁS ÉS HAJLÍTÁS SORÁN FELLÉPŐ LEHAJLÁS SZÁMÍTÁSA

Paik [8] az ortotróp lemezek nagy elhajlásának meghatározására differenciálegyenleteket használt. Az így felírt harmadfokú egyenletet, melynek változója az A_m rugalmas lehajlás, Galerkin módszerrel oldotta meg.

$$C_1 A_m^3 + C_2 A_m^2 + C_3 A_m + C_4 = 0 \quad (7)$$

ahol

$$C_1 = \frac{\pi^2}{16} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right) \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{3\pi^2 A_{om}}{16} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right) \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{\pi^2 A_{om}^2}{8} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right) + \frac{m^2 B}{L} \sigma_{sav} + \frac{\pi^2}{t_F} \left(D_x \frac{m^4 B}{L^3} + 2H \frac{m^2}{LB} + D \frac{L}{B^3} \right) \quad (10)$$

$$C_4 = A_{om} \frac{m^2 B}{L} \sigma_{sav} - \frac{16LB}{\pi^4 t_F} p \quad (11)$$

A (7) egyenlet megoldása

$$A_m = -\frac{C_2}{3C_1} + k_1 + k_2 \quad (12)$$

ahol

$$k_1 = \sqrt[3]{-\frac{Y}{2} + \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}}} \quad (13)$$

$$k_2 = \sqrt[3]{-\frac{Y}{2} - \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}}} \quad (14)$$

$$X = \frac{C_3}{C_1} - \frac{C_2^2}{3C_1^2}, Y = \frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2 C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \quad (15)$$

4. HOSSZIRÁNYÚ HEGESZTÉSŐL SZÁRMAZÓ ELHAJLÁS SZÁMÍTÁSA

Jármái & Farkas [5] szerint

$$f_{\max} = CL^2/8 \quad (16)$$

ahol az acélok görbülete

$$C = 0.844 \times 10^{-3} Q_T y_T / I_x \quad (17)$$

ahol Q_T a hőbevitel, y_T a hegesztési excentricitás,

$$Q_T = 2 \times 59.5 a_w^2 \quad (18)$$

$$y_T = y_G - t_F / 2 \quad (19)$$

ahol I_x az alaplemezt és a bordát is magába foglaló b szélességre vett inercianyomaték.

5. A FESZÜLTSÉGI FELTÉTEL

$$\sigma_{\max} = \sigma_{sav} + \frac{M}{I_x} y_G \leq \sigma_{UP} \quad (20)$$

ahol

$$M = \sigma_{sav} (A_{om} + A_m + f_{\max}) + \frac{qL^2}{8} \quad (21)$$

Helyi horpadásnál b helyett Mikami & Niwa [10] kísérletei alapján

$$b_l = \max(a_3, b - a_3) \quad (22)$$

számolunk, amelyet a kezdeti alakpontatlanság és a maradandó hegesztési feszültség hatása miatt veszünk számításba.

$$\sigma_{UP} = f_y \quad \text{ha} \quad \lambda_p \leq 0.526 \quad (23a)$$

$$\sigma_{UP} = \left(\frac{0.526}{\lambda_p} \right)^{0.7} \quad \text{ha} \quad \lambda_p \geq 0.526 \quad (23b)$$

ahol

$$\lambda_p = \left(\frac{4\pi^2 E}{10.92 f_y} \right)^{1/2} \frac{b_l}{t_F} = \frac{b_l / t_F}{56.8 \varepsilon} \quad (24)$$

6. A KÖLTSÉGFÜGGVÉNY

A célfüggvényt kell minimalizálni, amely az anyagköltség és a hegesztési költség összege

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \sum T_i \quad (25)$$

vagy más alakban

$$\frac{K}{k_m} = \rho V + \frac{k_f}{k_m} (T_1 + T_2 + T_3) \quad (26)$$

ahol ρ az alapanyag sűrűség, V a szerkezet térfogata, K_m és K_f valamint k_m és k_f anyag és előállítási költségek és tényezők, T_i előállítási idők a következők szerint:

- összeszerelési és összefűzési idő

$$T_1 = \Theta_d \sqrt{\kappa \rho V} \quad (27)$$

ahol Θ_d a hegesztett szerkezet bonyolultsági tényezője, κ a szerkezet összeszerelendő részeinek száma;

- T_2 hegesztési idő, és T_3 a járulékos idők, mint például elektroda csere $T_3 \approx 0.3T_2$

$$T_2 + T_3 = 1.3 \sum C_{2i} a_{wi}^n L_{wi} \quad (28)$$

ahol L_{wi} a varrathossz, C_2 értéke a hegesztési eljárásra vonatkozó állandó, α a varratméret. Esetünkben a szerkezet térfogata

$$V = BLt_f + (\varphi - 1)A_s L, \quad (29)$$

a hegesztési hosszúság

$$L_w = 2(\varphi - 1)L \quad (30)$$

és SAW (fedettívű automatikus hegesztés) esetén a sarokvarratok

$$C_w a_w^n = 0.3258 \times 10^{-3} a_w^2 \quad (31)$$

Az optimumokat $k_f/k_m = 0$ és 1.5 kg/min költségekre számítjuk. $k_f/k_m = 0$ megfelel az alapanyag költségre, 1.5 pedig a magasabb gyártási költségre való tervezésnek.

7. AZ OPTIMALIZÁLÓ ELJÁRÁS

Rosenbrock-féle Hillclimb [12] matematikai módszert használunk a költségfüggvény minimalizálására. Az iterációs algoritmus, mely Hooke és Jeeves-féle kereső eljárásan alapul, egy kezdőérték megadásával indul, és kis lépéseket téve a keresés során az ortogonális koordináták irányában. A kereső eljárás a folytonos optimum meghatározására akkor fejeződik be, ha a konvergencia kritérium teljesül. Az algoritmus módosításra került úgy, hogy másodlagos keresést végez a diszkrét értékek meghatározására. Ez a módszer nem igényel deriválást. Az eljárás a

konvergencia kritérium teljesülése, vagy az iterációs szám határának elérése esetén áll meg.

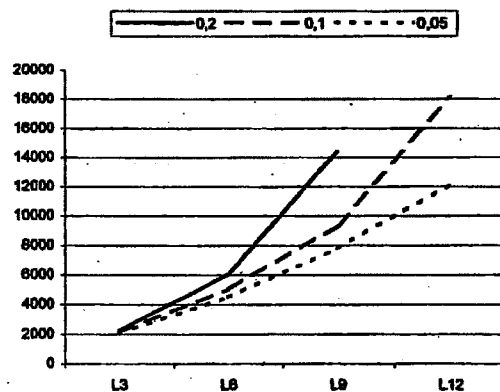
8. SZÁMADATOK

$B = 3000$ mm, $L = 3000, 6000, 9000, 12000$ mm, $N = 1.974 \times 10^7$ N, $p = 0.05, 0.1, 0.2$ MPa, $f_y = 235, 355$ MPa, $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, $\rho = 7.85 \times 10^{-6}$ kg/mm³.

9. EREDMÉNYEK

Az alaplemez és a trapézborða vastagsági minimuma és maximuma $t_{fmin} = t_{Smin} = 4$ mm. Az alaplemez vastagsága legfeljebb $t_{fmax} = 40$ mm, bordáé pedig a hidegmegmunkálás miatt $t_{Smax} = 10$ mm. A bordák száma $\varphi_{min} = 3$ és $\varphi_{max} = 15$ lehet. Paraméter vizsgálatot végzünk négy hossz, két folyáshatár és három függőleges terhelés figyelembevételével.

Egy konkrét esetre $L = 6000$ mm, $f_y = 235$ MPa, $p = 0.2$ MPa kiszámolva az optimumot $t_f = 36$ mm, $t_s = 11$ mm, $\varphi = 3$ geometriát kapunk, amely (26)-os egyenlet optimális eredményként 6046 kg alapanyag-költséget, és 7114 kg alapanyag és hegesztési költséget adja. Ebben az esetben mindkét eredmény optimális eredményt ad. Az optimalizált eredményeket az 1. illetve a 3. táblázat mutatja, mely értékei a célfüggvény értelmében kg-ban értendők, és a 2. illetve a 4. táblázatban 100%-nak vesszük az $L = 3000$ mm-hez tartozó értékeket.



3. ábra $f_y = 235$ MPa szerkezeti acél alapanyagköltséggel számolva

1. táblázat Alapanyag költségre ($k_f/k_m = 0$ kg/min) számolva az optimumot

f_y	p	L3000	L6000	L9000	L12000
235	0,2	2262	6046	14424	-
235	0,1	2155	5057	9329	18100
235	0,05	2084	4524	7798	12156
355	0,2	1656	4613	9253	-
355	0,1	1500	3827	7132	11489
355	0,05	1420	3313	5823	9226

2. táblázat Alapanyag költségére ($k_F/k_M = 0$ kg/min) számolva az optimumot

f_y	p	L3000	L6000	L9000	L12000
235	0,2	100%	267%	638%	-
235	0,1	100%	235%	433%	840%
235	0,05	100%	217%	374%	583%
355	0,2	100%	278%	559%	-
355	0,1	100%	255%	475%	766%
355	0,05	100%	233%	410%	649%

3. táblázat Alapanyag és hegesztési költségére ($k_F/k_M = 1.5$ kg/min) számolva az optimumot

f_y	p	L3000	L6000	L9000	L12000
235	0,2	2835	7114	18835	-
235	0,1	2656	6073	10905	22995
235	0,05	2579	5451	9178	14114
355	0,2	2223	5486	10826	-
355	0,1	2065	4840	8378	13423
355	0,05	1995	4232	7329	10660

4. táblázat Alapanyag és hegesztési költségére ($k_F/k_M = 1.5$ kg/min) számolva az optimumot

f_y	p	L3000	L6000	L9000	L12000
235	0,2	100%	250%	664%	-
235	0,1	100%	229%	411%	866%
235	0,05	100%	211%	356%	547%
355	0,2	100%	247%	487%	-
355	0,1	100%	234%	406%	650%
355	0,05	100%	212%	367%	535%

10. KÖVETKEZTETÉSEK

- a 355 MPa folyáshatárú szerkezeti acél 21 – 41 %-al az olcsóbb megoldásokat ad a normál acélnál;
2. és 4. táblázatból látható, hogy a hossz változásánál nagyobb arányban növekszenek a költségek;
- a függőleges terhelést $p = 0.05$ MPa-ról kétszeresére növelve 3 – 63 %-al, négyszeresére növelve 9 – 106 %-al nő a költség a lemezhosszúság függvényében;
- nagyobb geometriájú lemezeknél a méretkorlátozási feltételek aktívvá válnak, így $p = 0.2$ MPa terheléshez tartozó $L = 12000$ mm-es lemezhosszúságnál már nincs megoldás.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk elkészítéséhez az OTKA T38058, T37941 és FKFP 8/2000 nyújtott támogatást.

IRODALOM

- [1] Bonello, M.A., Chryssanthopoulos, M.K., Dowling, P.J.: Ultimate strength design of

stiffened plates under axial compression and bending. Marine Structures 6, 533-552., 1993

[2] Davidson, P.C., Chapman, J.C., Smith, C.S., Dowling, P.J.: The design of plate panels subject to biaxial compression and lateral pressure. Trans Royal Institution of Naval Architects 134, 149-160., 1992

[3] Smith, C.S., Anderson, N., Chapman, J.C., Davidson, P.C., Dowling, P.J.: Strength of stiffened plating under combined compression and lateral pressure. Trans Royal Institution of Naval Architects 134, 131-147., 1992

[4] Mansour, A.E.: Post-buckling behaviour of stiffened plates with small initial curvature under combined loads. Internat. Shipbuilding Progress 18:202, 217-240., 1971

[5] Farkas, J., Jármay, K.: Minimum cost design and comparison of uniaxially compressed plates with welded flat-, L- and trapezoidal stiffeners. Welding in the World 44:3, 47-51., 2000

[6] Farkas, J., Simoes, L.M.C., Jármay, K.: Minimum cost design of a welded stiffened square plate loaded by biaxial compression. WCSMO-4, 4th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Dalian China, 2001. Extended Abstracts 136-137., 2001

[7] Virág, Z.: Optimum design of stiffened plates, MicroCAD2000, Miskolc, 2000. február 23-24., ISBN 963 661 423 7, 111-116., 2000

[8] Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Kim, B.J.: Large deflection orthotropic plate approach to develop ultimate strength formulations for stiffened panels under combined biaxial compression/tension and lateral pressure. Thin-Walled Structures 39, 215-246., 2001

[9] Paik, J.K., Kim, B.J.: Ultimate strength formulations for stiffened panels under combined axial load, in-plane bending and lateral pressure: a benchmark study. Thin-Walled Structures 40, 45-83., 2002

[10] Mikami, I., Niwa, K.: Ultimate compressive strength of orthogonally stiffened steel plates. J. Struct. Engng ASCE 122:6, 674-682., 1996

[11] Jármay, K., Farkas, J.: Cost calculation and optimization of welded steel structures. Journal of Constructional Steel Research 50, 115-135., 1999

[12] Rosenbrock, H.H.: An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer Journal, 3, 175-184., 1960